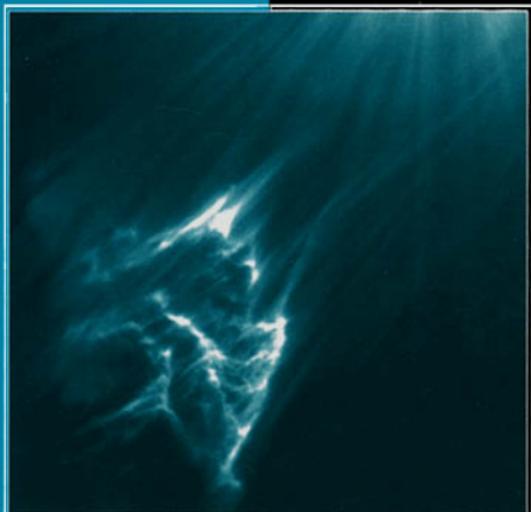


ASTROPHYSIQUE

James LEQUEUX

Avec le concours
d'Edith FALGARONE et Charles RYTER

Le milieu interstellaire



SAVOIRS ACTUELS

CNRS EDITIONS

Extrait de la publication

EDP
SCIENCES

Le milieu interstellaire

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

James Lequeux

Avec le concours

d'Edith Falgarone et Charles Ryter

Le milieu interstellaire

S A V O I R S A C T U E L S

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

Illustration de couverture :

La nébuleuse par réflexion IC 349 dans les Pléiades. La poussière interstellaire est illuminée par l'étoile Mérope située en haut, en dehors du champ. Voir la planche 15. *Document Télescope Spatial Hubble.*

© 2002, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

et

CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 2-86883-533-3

ISBN CNRS ÉDITIONS 2-271-05955-0

À Geneviève

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

Table des matières

Avant-propos	xiii
1 Notre Galaxie, hôte du milieu interstellaire	1
1.1 Notre Galaxie : les ordres de grandeur	2
1.2 Les populations stellaires	6
1.2.1 Généralités	6
1.2.2 Les populations du disque	7
1.2.3 Le bulbe et le halo	9
1.3 Distribution de la matière interstellaire	10
2 Rayonnements et champ magnétique	15
2.1 Les champs de rayonnement	15
2.1.1 Les rayonnements extragalactiques	16
2.1.2 Les rayonnements galactiques	16
2.2 Le champ magnétique interstellaire	21
2.2.1 Mesure du champ magnétique par effet Zeeman	24
2.2.2 Mesure du champ magnétique par rotation Faraday	25
2.2.3 Estimation du champ magnétique à partir du rayonnement synchrotron galactique	26
2.2.4 Estimation de la direction du champ magnétique par polarisation linéaire de la lumière	28
2.2.5 Résultats	29
3 Transfert du rayonnement et excitation	31
3.1 L'équation de transfert	31
3.1.1 Démonstration	31
3.1.2 Approximation de Rayleigh-Jeans. Notations radioastronomiques	34
3.1.3 Température d'excitation	37
3.2 Système à deux niveaux d'énergie hors ETL	38
3.2.1 Relations générales	38
3.2.2 Cas de l'équilibre radiatif pur	39

3.2.3	Couplage de l'excitation et du transfert, approximation LVG	40
3.3	Cas général ; masers	45
4	Le gaz interstellaire neutre	51
4.1	Le gaz neutre atomique	51
4.1.1	La raie 21 cm de l'hydrogène atomique	52
4.1.2	Les raies de structure fine dans l'infrarouge lointain	58
4.1.3	Les raies d'absorption interstellaires	62
4.2	La composante moléculaire	71
4.2.1	Généralités	71
4.2.2	Les transitions électroniques	74
4.2.3	Les transitions vibrationnelles	76
4.2.4	Les transitions rotationnelles	81
4.2.5	Les bandes interstellaires diffuses	93
5	Le gaz interstellaire ionisé	97
5.1	Les régions H II	97
5.1.1	Théorie de l'ionisation ; la sphère de Strömgen	98
5.1.2	L'émission continue du gaz ionisé	102
5.1.3	Les raies de recombinaison	107
5.1.4	Les raies de recombinaison radio	113
5.1.5	Les raies interdites	117
5.1.6	La détermination des abondances dans les régions H II	120
5.2	Le gaz ionisé diffus	122
5.3	Le gaz chaud	125
5.3.1	L'ionisation par collisions électroniques à haute température	125
5.3.2	L'émission de raies X	128
5.3.3	Émission X thermique continue	128
5.3.4	Résultats	129
5.4	L'absorption X	130
6	Le milieu interstellaire aux hautes énergies	133
6.1	Les rayons cosmiques	133
6.1.1	Origine des rayons cosmiques	134
6.1.2	Les rayons cosmiques solaires et la modulation solaire	135
6.1.3	Les rayons cosmiques galactiques	136
6.1.4	Les rayons cosmiques de très haute énergie	142
6.1.5	Les électrons cosmiques	145
6.1.6	Confinement des rayons cosmiques dans la Galaxie	145
6.2	Le continuum en rayons gamma	149
6.2.1	Production de gammas par interactions nucléaires	150
6.2.2	Production de gammas par rayonnement de freinage	153
6.2.3	Production de gammas par effet Compton inverse	153

6.3	La masse du milieu interstellaire	154
6.3.1	Utilisation des observations gamma pour déterminer la masse du milieu interstellaire dans la Galaxie	155
6.3.2	Utilisation de la masse du viriel des nuages moléculaires	158
6.3.3	Comparaison W_{CO} -extinction	159
6.3.4	Absorption en rayons X ou en infrarouge moyen	162
6.4	Les raies gamma	163
7	Les poussières interstellaires	167
7.1	Rougisement et extinction interstellaires	168
7.1.1	Généralités	168
7.1.2	Extinction et modèles de poussières	175
7.1.3	Diffusion des rayons X par les poussières	178
7.2	L'émission des poussières interstellaires	179
7.2.1	Les grains à l'équilibre thermique	179
7.2.2	Les petits grains hors d'équilibre thermique	184
7.2.3	Les bandes d'émission aromatiques dans l'infrarouge moyen	189
7.2.4	Les très petits grains	195
7.2.5	Les gros grains	195
7.3	Modèles globaux	196
7.4	Absorptions infrarouges et manteaux de glace	197
7.5	La fluorescence infrarouge	200
8	Chauffage et refroidissement du gaz interstellaire	201
8.1	Processus de chauffage	202
8.1.1	Généralités, temps de thermalisation	202
8.1.2	Chauffage par rayons cosmiques de basse énergie	206
8.1.3	Chauffage par effet photoélectrique sur les grains	210
8.1.4	Chauffage par ionisation des atomes et des molécules	215
8.1.5	Chauffage par rayons X	216
8.1.6	Chauffage chimique	217
8.1.7	Chauffage par échange thermique grains/gaz	219
8.1.8	Chauffage hydrodynamique et magnéto-hydrodynamique	221
8.2	Processus de refroidissement	222
8.2.1	Refroidissement par les raies de structure fine	222
8.2.2	Refroidissement par excitation collisionnelle de raies permises	225
8.2.3	Refroidissement par recombinaisons électrons-ions	228
8.2.4	Refroidissement par les poussières	229
8.3	Équilibre et stabilité thermiques	229
8.3.1	Milieu atomique	229

8.3.2	Gaz ionisé chaud	234
8.3.3	Régions H II	234
8.3.4	Nuages moléculaires	235
9	Chimie interstellaire	237
9.1	Chimie en phase gazeuse	237
9.1.1	Réactions ion-molécule	238
9.1.2	Association radiative	239
9.1.3	Recombinaison dissociative	241
9.1.4	Réactions neutre-neutre	241
9.1.5	Photodissociation et photo-ionisation	242
9.2	Chimie à la surface des grains de poussière	244
9.2.1	Formation de H ₂ sur les grains	245
9.2.2	Formation d'autres molécules sur les grains	247
9.3	Chimie à l'équilibre et cinétique chimique	249
9.4	Quelques résultats	250
9.4.1	Chimie dans le milieu interstellaire diffus	251
9.4.2	Chimie dans les nuages moléculaires denses	253
10	Les régions de photodissociation	259
10.1	Présentation générale	259
10.2	Physico-chimie	262
10.2.1	Pénétration du rayonnement UV lointain et photodissociation	262
10.2.2	Chimie	263
10.2.3	Mécanismes de chauffage	263
10.2.4	Mécanismes de refroidissement	265
10.3	Modèles stationnaires	266
10.4	Modèles hors d'équilibre	274
11	Les chocs	277
11.1	Équations de la dynamique du gaz	277
11.1.1	Fluide unique	277
11.1.2	Milieu multi-fluide	279
11.2	Les différents types de chocs	280
11.2.1	Chocs sans champ magnétique	282
11.2.2	Chocs avec champ magnétique	286
11.2.3	Chocs multi-fluides dans un gaz faiblement ionisé	287
11.3	Chocs non stationnaires	290
11.4	Physico-chimie dans les chocs	292
11.5	Rayonnement et diagnostic des chocs	295
11.6	Instabilités dans les chocs	298

12 Applications des chocs	301
12.1 Les restes de supernova	301
12.1.1 Phase d'expansion libre	302
12.1.2 Phase adiabatique	303
12.1.3 Phase d'expansion isotherme, ou radiative	306
12.1.4 Évolution des plérions	307
12.1.5 Expansion des restes de supernova dans un milieu inhomogène	308
12.1.6 Rayonnement non thermique des restes de supernova	309
12.2 Les bulles	311
12.3 Dynamique des régions H II	314
12.3.1 Le front d'ionisation	314
12.3.2 Le choc	317
12.3.3 Globules neutres dans une région H II	319
12.3.4 Évolution des régions H II	323
12.4 Accélération des rayons cosmiques	325
12.4.1 Propagation des particules chargées dans un champ magnétique	326
12.4.2 Diffusion des particules chargées dans un milieu désordonné	330
12.4.3 Pertes d'énergie	333
12.4.4 Accélération des particules chargées	334
13 La turbulence interstellaire	345
13.1 Structure en vitesse et fragmentation	345
13.2 La turbulence incompressible	349
13.2.1 Apparition de la turbulence	349
13.2.2 La turbulence développée de Kolmogorov	350
13.2.3 Viscosité et pression turbulentes	352
13.2.4 L'intermittence	354
13.3 La turbulence dans le milieu interstellaire	355
13.4 Quelques effets de la turbulence interstellaire	357
13.4.1 Transport turbulent et chimie interstellaire	357
13.4.2 L'intermittence, source de chauffage pour le gaz	361
14 Équilibre, effondrement, formation des étoiles	367
14.1 Stabilité et instabilité : le théorème du viriel	367
14.1.1 Forme simple du théorème du viriel, sans champ magnétique et sans pression extérieure	367
14.1.2 Longueur et masse de Jeans	369
14.1.3 Forme générale du théorème du viriel	372
14.1.4 Stabilité de l'équilibre du viriel	374
14.1.5 Distribution de densité dans un nuage sphérique à l'équilibre	378

14.1.6	Stabilité et instabilités en présence d'un champ magnétique	380
14.1.7	Couplage du gaz au champ magnétique : la diffusion ambipolaire	384
14.2	Effondrement et fragmentation	389
14.2.1	Le temps de chute libre	389
14.2.2	Configurations pendant l'effondrement	390
14.2.3	Rôle de la rotation	392
14.2.4	Rôle du champ magnétique	395
14.3	Fin de l'effondrement, formation des étoiles	397
14.4	La fonction de masse initiale et son origine	398
14.4.1	Déterminations de la fonction de masse initiale et problèmes	398
14.4.2	Origine de la fonction initiale de masse	401
15	Changements d'état et transformations	403
15.1	Gaz atomique, gaz moléculaire et gaz ionisé tiède	404
15.1.1	Gaz ionisé et échanges avec le gaz neutre	404
15.1.2	Échanges gaz atomique/gaz moléculaire	406
15.2	Gaz chaud, fontaine galactique	411
15.3	Échanges gaz-poussières	414
15.4	Évolution des poussières interstellaires	418
15.4.1	Poussières dans les enveloppes circumstellaires et les nébuleuses planétaires	418
15.4.2	Poussières dans le milieu interstellaire	419
15.4.3	Poussières autour des protoétoiles et dans le Système solaire	420
	Signification des sigles des références	422
	Bibliographie	423
	Planches en couleurs	441
	Signification des principaux symboles	473
	Principales constantes	477
	Unités et conversions	478
	Index	479

Avant-propos

CET OUVRAGE s'insère dans la série des livres de la collection « Savoirs actuels » consacrés à l'astronomie. Les précédents traitent respectivement des techniques de l'astronomie, du Système solaire, des étoiles, des galaxies et de la cosmologie.

Bien que sa densité soit en général faible, la matière située entre les étoiles joue un grand rôle. C'est à partir d'elle que se forment les étoiles par effondrement gravitationnel. Au cours de leur vie, et surtout pendant la phase finale de leur évolution, les étoiles rejettent une partie de leur matière dans le milieu interstellaire. Cette matière est enrichie en éléments lourds par les réactions thermonucléaires qui ont eu lieu au sein des étoiles. De nouvelles étoiles se forment dans le milieu interstellaire ainsi enrichi. L'évolution de l'Univers est donc caractérisée par un échange continu de masse entre les étoiles et le milieu qui les baigne. Cet échange a lieu à l'intérieur des galaxies, mais il y a aussi échange de matière entre le milieu interstellaire des galaxies et le milieu intergalactique.

La matière interstellaire se compose de gaz atomique, moléculaire et ionisé à diverses températures, et aussi de poussières, lesquelles renferment une grande partie des éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium. Ces poussières sont formées autour des étoiles à la fin de leur vie, mais elles sont continuellement détruites, altérées et reformées dans le milieu interstellaire. Elles jouent un double rôle. D'une part elles absorbent une grande partie des photons émis par les étoiles, les poussières ainsi chauffées réémettant l'énergie qu'elles ont absorbée par rayonnement thermique dans l'infrarouge moyen et lointain. D'autre part, la surface des poussières est le siège de la formation de nombreuses molécules, notamment de la plus abondante : la molécule d'hydrogène H_2 . La physique et la chimie interstellaires ont un grand intérêt

général car les conditions qui règnent dans le milieu sont très différentes de celles des laboratoires terrestres, et les processus élémentaires sont souvent mieux visibles en raison de la faiblesse des densités.

Le but de cet ouvrage est de décrire la matière interstellaire de notre Galaxie sous ses différentes phases, ainsi que les processus physiques et chimiques qui y prennent place. Le lecteur se heurtera, comme les auteurs s'y sont heurtés, à l'extrême complexité du milieu interstellaire, qui fait qu'il n'est pas possible de le décrire d'une façon linéaire. De surcroît, notre conception même de ce milieu subit une profonde évolution au moment où nous écrivons, car on réalise progressivement qu'il est le plus souvent turbulent et hors d'équilibre. Mais nous n'en savons pas encore assez pour qu'il soit nécessaire d'abandonner les concepts relativement simples qui ont régi son étude jusqu'à ce jour, concepts qui restent à la base de ce livre et dont le rôle pédagogique subsistera longtemps encore.

Les sept premiers chapitres présentent les différentes composantes de la matière interstellaire, et détaillent leurs principales méthodes d'étude. Les sept chapitres qui suivent sont centrés sur les processus physiques et dynamiques qui régissent son comportement, entre autres les instabilités et l'effondrement gravitationnel qui aboutissent à la formation des étoiles. Le dernier chapitre résume les transformations entre les phases du milieu interstellaire.

Suivant la ligne de cette série, le présent ouvrage est destiné aux étudiants avancés, ainsi qu'aux chercheurs débutants ou aux chercheurs confirmés désireux d'aborder un domaine nouveau pour eux. Il peut paraître exagérément ambitieux de vouloir écrire un nouveau traité sur le milieu interstellaire après l'ouvrage classique de Spitzer, *Physical processes in the interstellar medium* [467]. Cependant le sujet s'est considérablement développé depuis la parution de ce livre il y a un quart de siècle. Par ailleurs, il nous semble que le livre de Spitzer, malgré sa haute valeur pédagogique, est souvent très concis et difficile à suivre même par des étudiants avancés. Nous n'avons pas hésité à reproduire certaines démonstrations données dans cet ouvrage, mais avec davantage de détails afin d'éviter au lecteur des efforts inutiles.

Nous avons choisi d'insister sur les méthodes d'étude, qui évoluent relativement peu, plutôt que sur les résultats qui sont souvent rapidement dépassés. Sans prétendre à être complets dans un domaine aussi complexe, nous avons voulu fournir au lecteur l'essentiel des outils nécessaires pour aborder directement la recherche. C'est pourquoi, à côté de tables contenant des données utiles, nous donnons une quantité substantielle de références. Ces références ont principalement été choisies pour leur rôle pédagogique : notre ouvrage n'est pas une revue, et il ne nous est pas possible de donner crédit à tous ceux qui ont développé le sujet. Les illustrations dans le texte sont le plus souvent extraites directement des articles de recherche, et nous n'avons pas en général traduit en français les annotations présentes sur ces figures, car nous

avons pensé que le lecteur n'aurait pas de difficulté à les comprendre. Nous avons par ailleurs inséré dans l'ouvrage de nombreuses planches en couleurs, quelquefois inédites. Regroupées à la fin du volume, elles illustrent les aspects très variés du milieu interstellaire.

Nous avons choisi d'exprimer en général les quantités que nous discutons dans le système c.g.s. et non pas dans le système international (S.I.) m.k.s.a. Nous avons conscience d'aller ainsi quelque peu à contre-courant, mais on ne peut que constater que le système c.g.s. est utilisé dans la très grande majorité des articles que l'on sera amené à consulter. Une table de conversion des principales unités c.g.s./m.k.s.a. et une liste des valeurs des constantes les plus utilisées sont données en fin d'ouvrage.

Nous remercions Patrick Boissé, François Boulanger et Guillaume Pineau des Forêts, qui ont bien voulu relire des parties de cet ouvrage, et surtout Laurent Verstraete et Anthony Jones pour leurs critiques toujours pertinentes et constructives. Nous remercions aussi tous les collègues qui nous ont fourni des illustrations, notamment Jean-Charles Cuillandre. Nous voudrions enfin exprimer notre gratitude envers le NASA Astrophysics Data System (ADS), qui nous a été d'une très grande utilité dans nos recherches bibliographiques.

Charles Ryter tient à remercier le Service d'Astrophysique du CEA et son directeur, Laurent Vigroux, pour son hospitalité pendant la rédaction de ce livre.

Cette page est laissée intentionnellement en blanc.

Chapitre 1

Notre Galaxie, hôte du milieu interstellaire

COMME TOUTES les galaxies, notre Galaxie¹, la Voie lactée, est un système extrêmement complexe d'étoiles, de gaz et de particules solides (voir la Planche 1 pour une galaxie vue de face et la Planche 2 pour des images de la Voie lactée à différentes longueurs d'onde). Ces éléments baignent dans un champ magnétique, des rayonnements s'étendant sur l'ensemble du spectre électromagnétique, et des particules « cosmiques » neutres ou chargées de toutes énergies. Les galaxies sont liées par leur propre gravité, et leurs différents constituants interagissent fortement, échangeant masse, quantité de mouvement et énergie. Il n'est donc pas possible de faire de ces systèmes une description linéaire dans laquelle les différents éléments seraient analysés les uns après les autres. La description ne pourra se faire que par approximations successives.

Il y a là non seulement une difficulté de présentation, mais aussi une vraie difficulté intellectuelle. Pour beaucoup de problèmes, une étoile peut être considérée comme un système isolé. Une galaxie comme la nôtre est, elle aussi, un système qu'on peut considérer comme isolé en première approximation, mais ce système est bien plus complexe qu'une étoile individuelle. On est donc amené à considérer des sous-systèmes plus simples : amas d'étoiles, nuages de matière interstellaire, etc. que l'on peut essayer de décrire par un modèle pour lequel les interactions avec le reste de la Galaxie sont prises comme des conditions aux limites. Ces conditions aux limites sont issues d'autres observations que l'on a elles-mêmes représentées par des modèles, qui isolent d'autres sous-systèmes avec des degrés variés d'approximation. Il en résulte que notre connaissance de la physique de la Galaxie – et plus spécialement de son problème central, la formation des étoiles – ne peut progresser que par approximations successives dans une description qui, même grossière, se doit

1. Dans ce livre, nous écrivons partout Galaxie avec un G majuscule, pour notre Voie lactée, afin d'éviter la confusion avec les autres galaxies.

d'être globale. À chaque étape, de nouvelles observations et une meilleure compréhension d'un sous-système modifient cette image globale et réagissent par là même sur la description des autres sous-systèmes.

La nature de l'astronomie, science d'observation où l'expérience directe est presque toujours impossible, interdit de tester la validité d'un mécanisme tendant à expliquer un ensemble d'observations, comme on le fait en physique expérimentale. Le plus souvent, on ne peut même pas avoir recours, comme en physique stellaire, à l'analyse statistique de familles relativement homogènes d'objets dont on peut espérer qu'un seul paramètre domine les variations observées. En effet, les propriétés qu'on veut décrire dépendent le plus souvent de l'environnement de l'objet.

Nous serons, au cours de l'exposé, amenés à donner avec peu de justifications des valeurs numériques pour certains paramètres galactiques. La confiance (ou les doutes) que l'on peut avoir en ces valeurs, et plus généralement dans l'identification des mécanismes essentiels, dépend de l'étendue de notre compréhension de l'ensemble de la Galaxie. Ce n'est que par la cohérence d'un ensemble complexe d'observations disparates que l'on pourra se convaincre de leur solidité.

1.1 Notre Galaxie : les ordres de grandeur

La Galaxie est un ensemble auto-gravitant. La partie la plus apparente est un *disque* d'étoiles en rotation. Le rayon de ce disque est d'environ 20 kpc (kiloparsec ; 1 parsec = $3,08 \cdot 10^{18}$ cm). Son épaisseur est de quelques centaines de parsecs. Le Soleil se trouve à 7-8 kpc du Centre galactique et tourne autour de lui avec une vitesse de l'ordre de $180\text{-}200 \text{ km s}^{-1}$. Ces quantités sont encore incertaines : pour une discussion récente, voir Olling & Merrifield [364]. La période de rotation pour les régions du disque situées à ce rayon est donc de l'ordre de 240 millions d'années.

À ce disque s'ajoute un système sphéroïdal peu aplati qui s'étend plus loin que le disque. Sa partie centrale, le *bulbe*, est très lumineuse sur un rayon de l'ordre de 2 kpc, mais ses parties externes, le *halo*, sont peu brillantes.

Ce système d'étoiles peut être considéré comme sans collisions. Le temps entre collisions est en effet :

$$\tau = (n\sigma_v 2\pi R^2)^{-1} = 10^{28} \left(\frac{n}{\text{pc}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{R}{R_\odot} \right)^{-2} \left(\frac{\sigma_v}{\text{km s}^{-1}} \right)^{-1} \text{ s}, \quad (1.1)$$

où la densité numérique des étoiles est n , R leur rayon moyen, σ_v leur dispersion de vitesse et $R_\odot = 6,955 \cdot 10^{10}$ cm le rayon du Soleil. Au voisinage du Soleil, $n < 1 \text{ pc}^{-3}$ et σ_v est de l'ordre de 10 à 30 km s^{-1} . Le temps de collision est donc typiquement 10^{10} fois l'âge de la Galaxie, qui est de l'ordre de $3 \cdot 10^{17}$ s. Même dans le parsec central de la Galaxie, où la densité d'étoiles est 10^7 fois plus grande, le temps de collision reste très grand.

Supernova de Tycho, 468
 SWAS (*satellite*), 62, 92, 225
 synchrotron (rayonnement), **26–28**, 29,
 145, 149, 303, 309, 310, 442,
 444, 465
 Système solaire, 333, 420, 421

T

Taurus, 10, 396
 Taylor (échelle de), 357
 télescope spatial Hubble, 62, 69, 449, 455,
 462, 470
 température
 d'antenne
 voir antenne, 35
 d'excitation, **37–38**, 45, 83
 de brillance, 34, 83, 114
 de lobe primaire, 35
 de spin, 52
 Tête de cheval (*nuage sombre*), 460, 461
 thermalisation, **202–206**
 Toomre (critère de), 407
 transfert
 équation de, 31, 114, 262
 du rayonnement, **31–50**
 trifide (Nébuluse) (*région H II*), 458
 trompes d'éléphant, 322
 turbulence, 344, 378
 compressible, 352, 355, 361, 372
 échelle dissipative de, 350
 échelle inertielle de, 350
 échelle intégrale (ou énergétique) de,
 350
 général, 56, 124, 311, **345–366**, **372**,
 396, 409
 incompressible (de Kolmogorov),
 349–355, 364
 intermittence dans la, 206, 354,
 361–366, 421

U

UIB
 voir bandes aromatiques
 ULYSSES (*satellite*), 341, 421

V

viriel (théorème du), 158, **367–374**
 viscosité, 278, 288, 362
 cinématique (ou moléculaire), 349,
 352, 356
 dynamique, 349
 général, 414
 turbulente, 352, 353, 357
 VLA (*Very Large Array du NRAO*),
 310, 465, 466, 468
 VLT (*Very Large Telescope de l'ESO*),
 452, 469, 472
 Voigt (fonction de), 64
 vortacité, 351, 354, 362–364

X

X
 absorption, 20, **130–132**, 162, 216
 diffusion, **178–179**, 180, 304, 421
 émission, 21, 51, 125, 128, 130, 155,
 216–217, 218, 295, 309, 442,
 451, 456, 465, 467, 468
 raie, 125, 127–129, 304, 468

Z

Zanstra (méthode de), 107
 Zeeman (effet), 24

Composition : e-press, Angle 197 bd Zerktouni et rue d'Avignon
Casablanca, Maroc
Imprimé en France – Jouve, 18, rue Saint-Denis, 75001 Paris
Dépôt légal : mars 2002